基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据

翁汉琍 1，刘华 1，林湘宁 2，万毅 3，李振兴 1，黄景光 1，鲁俊生 2

（1. 三峡大学 电气与新能源学院，湖北省 宜昌市 443002；2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)，湖北省 武汉市 430074； 3. 三峡电能有限公司，湖北省 宜昌市 443002）

A Novel Criterion of the Transformer Differential Protection based on the Hausdorff Distance Algorithm

WENG Han-Li 1, LIU Hua 1, LIN Xiang-Ning 2, WAN Yi 3, LI Zhen-Xing 1, HUANG Jing-Guang 1, LU Jun-Sheng 2

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China;

2. China State Key Laboratory of Electromagnetic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

3. Three Gorges Electric Energy Co., Ltd, Yichang 443002, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The characteristics of whole waveforms of magnetizing inrush current and fault differential current were analyzed. By virtue of the similarity difference between the two currents and combining the superiorities of the Hausdorff distance algorithm, a novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm was proposed. The Hausdorff distance between the normalized differential current sequence and standard sinusoidal wave sequence was applied to distinguish between inrush current(including symmetrical inrush current) and fault differential current(including fault differential current superimposed with inrush current). The effectiveness, rapidity and anti-interference performance of the proposed criterion were validated with simulation tests.

KEY WORDS: transformer; differential protection; symmetrical inrush current; waveform similarity; Hausdorff distance algorithm

摘要：对变压器励磁涌流和故障电流波形整体形态的特征进行分析，利用两者之间相似度差异，结合 Hausdorff 距离算法在图形相似度方面的优势，构造基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据，该判据采用标幺化后的差流序列和标准正弦波序列之间的 Hausdorff 距离值进行判别，以区分变压器的励磁涌流（包括对称性涌流）和故障差流（包括故障电流叠加励磁涌流）。通过仿真试验验证所提新判据的有效性、快速性和抗干扰性。

关键词：变压器，差动保护，对称性涌流，图形相似度 Hausdorff 距离算法

基金项目：国家自然科学基金项目 (51607106)；三峡大学人才科研启动基金项目(KJ2014B043)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51607106); China Three Gorges University Talent Scientific Research Foundation(KJ2014B043).

1 引言

随着特高压输电技术的发展和应用，更高电压等级输电工程的接入使得变压器传输容量巨大，例如，2014 年 1 月 27 日投运的哈密南-郑州 ±800kV 特高压直流输电工程，其额定输送功率达 8000MW，大型变压器保护的误动或拒动都可能带来无法承受的后果，因此变压器所配置保护的性能至关重要。差动保护由于原理简单、动作灵敏可靠，被广泛应用于作为变压器的主保护。但是，由于变压器铁芯存在饱和现象，变压器经历空载合闸和外部故障切除时会产生励磁涌流，这是影响变压器差动保护动作可靠性的最主要的问题。长期以来，研究人员一直致力于研究更优化的励磁涌流识别方法，并应用于实际保护系统中。

目前，励磁涌流的识别方法主要分为两大类，一类是以励磁涌流的产生机理为出发点，基于理论分析提出的识别方案，如磁通特性法[1,2]、等效瞬时电感/动态阻抗法[3,4]等原理，来提升差动保护对励磁涌流的识别能力，但此类方法必须用到电压

测量量，增加了电压互感器（PT）的投入成本，保护配置复杂化的同时也带来了 PT 断线引起的保护不正确动作的风险，实用性受到限制。

另一类则是单纯以励磁涌流的波形特征为出发点，通过波形的对比分析来实现涌流的识别，例如基于二次谐波特性[5]、波形对称性[6]和间断角特性[7]等判据，在现场得到广泛应用。但是由于现代变压器铁心材料的改进、系统中并联电容器的应用，以及交直流混联耦合使得变压器工作的电磁暂态环境更为复杂，可能使涌流和故障电流的波形及谐波特征差异弱化，因涌流对称性好而导致二次谐波制动判据失效差动保护发生误动[8]，甚至出现现场二次谐波制动原理和波形对称性制动原理的两套保护同时误动的案例[9]。

值得注意的是，从波形特征来讲，涌流的产生受变压器铁芯饱和的影响，波形与主要呈正弦特性的故障电流存在差异，因此可利用这样的差异来构造波形相似度的判据，此类判据简单易实现，例如，文献[10-14]采用不同算法来对差流波形正弦度或波形相关系数进行计算，设置门槛，以有效区分涌流和故障电流。但上述算法均需首先对差流直流分量进行滤波处理；其次，在执行计算时，数据窗需要至少半个甚至一个周波才能做出判断；并且，在差流采样序列中有幅值较大的畸变点时，计算结果将受到很大影响，算法抗干扰能力较弱。因此，我们考虑进一步研究算法简单、判别快速并具有较强抗干扰性的波形相似度识别新判据，以提升变压器差动保护的动作性能。

本文在对变压器励磁涌流（包括对称性涌流）与故障电流（包括故障电流叠加典型涌流）波形差异分析的基础上，结合 Hausdorff 距离算法在时窗选择、频率适应性及抗数据丢失能力等方面的优势，构造基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据；对变压器经历空载合闸、带故障合闸、区内故障和涌流后又发生故障等各种情况时，新判据的有效性进行了仿真试验验证，结果表明该判据原理简单，易于实现，能对变压器励磁涌流和故障差流进行正确识别，在速动性和抗干扰性方面优势明显。

2 Hausdorff 距离算法的基本原理

图形相似度算法是一种比较两幅图像的整体特性而不局限于某些小范围特征影响的算法。图形识别算法一般分为两大类，一类基于图形灰度信息，如 PCA 主元分析算法；另一类基于图形的特征点，如 Hausdorff 距离算法[15,16]。

对于两组点集 $\boldsymbol{A}=\{a_1,\ldots,a_p\}$，$\boldsymbol{B}=\{b_1,\ldots,b_q\}$，其 Hausdorff 距离定义为：

$$H(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = \max(h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}), h(\boldsymbol{B},\boldsymbol{A})) \qquad (1)$$

其中：

$$h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = \max_{a_i \in \boldsymbol{A}} \min_{b_j \in \boldsymbol{B}} \left| a_i \text{-} b_j \right| \qquad (2)$$

$$h(\boldsymbol{B},\boldsymbol{A}) = \max_{b_j \in \boldsymbol{B}} \min_{a_i \in \boldsymbol{A}} \left| b_j \text{-} a_i \right| \qquad (3)$$

$|\bullet|$是点集 $\boldsymbol{A}$ 和点集 $\boldsymbol{B}$ 间的距离范数。式(2)中首先对点集 $\boldsymbol{A}$ 中每个点（如 a_i）与点集 $\boldsymbol{B}$ 中所有点进行距离比较，找到对于 a_i 最近的点 b_j：$|a_i - b_j|$ �$|a_i \quad b_k|$ ($1 \le k \le q$ 且 $k \ne j$)，$|a_i - b_j|$即为对应 a_i 点的最小距离，$h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$即为所有集合 $\boldsymbol{A}$ 中点的最小距离的最大值，称为从点集 $\boldsymbol{A}$ 到点集 $\boldsymbol{B}$ 的单向 Hausdorff 距离。式(1)的 Hausdorff 距离为单向距离 $h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$和 $h(\boldsymbol{B},\boldsymbol{A})$的较大值。

Hausdorff 距离是描述两组点集之间相似程度的一种量度，它度量了两组点集间的最大不匹配程度，亦即反映目标图形与模板图形边缘特征点之间的匹配程度。在生物医学领域，已有研究采用 Hausdorff 距离算法来实现生物医学信号的相似性判断，例如利用 Hausdorff 距离算法来实现对随时间变化的心电波形与正常心电波形相似度的判别[17,18]。

而在继电保护系统中，传感器所采集的电流数据以二维点集的形式存在，可看作是一个以时间为横坐标，幅值大小为纵坐标的离散时间序列，每一个电流数据点都相当于图形的某个特征点，这与前面所提心电波形类似，因此也可以直接用于进行 Hausdorff 距离计算。

3 Hausdorff 距离算法的特点及对差动保护需求的适应性

相比于传统差动保护算法中应用的逐点比较差值寻获的算法，Hausdorff 距离算法具有以下特点：

第一，Hausdorff 距离算法可以根据需求自由选择数据窗长度。传统的保护算法一般采用傅里叶算法，常用的有全周傅里叶算法以及半周傅里叶算法。但是这两种算法都需要保证时间窗的长度是电流半周期的整数倍。在继电保护工程应用实际中，这种时间窗特性导致处理故障信号时至少有 10ms

的延迟，并且不能根据需求灵活设置时间窗长度。而 Hausdorff 距离算法不涉及信号从时域到频域的投射，因此时间窗的设置可以更灵活，考虑到继电保护的速动性需求，在下面的算法设计时，拟采用 1/4 周波的 Hausdorff 距离计算时窗，其窗长仅为 DFT 的 1/4 到 1/2，进一步体现其对继电保护速动性需求的适应性；

第二，Hausdorff 距离算法受采样频率的影响较小。传统傅里叶算法对保护装置采样频率的要求较高，如果保护装置采样率过低，会导致信号在频域的投射不准确。而 Hausdorff 距离算法多考虑的是整体特征的一致性，而对采样点的时域对齐及采样率的统一性并没有严格要求，例如 1.2kHz 的采样率相比于 4kHz 的采样率，只是波形特征值的选取比较稀疏，不会造成特征值的错误，对于波形整体特征的判断没有影响；

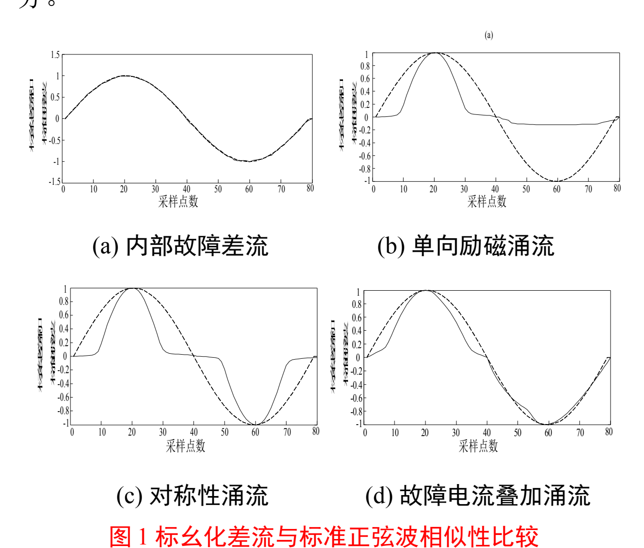
第三，Hausdorff 距离算法具有抗数据丢失能力。个别数据点的丢失往往会造成采样值差动算法失效。但对于 Hausdorff 距离算法而言，并不影响其对图形整体特征的判断，利用该特性，在进行距离计算前，可根据实际情况设计舍弃若干极值点，并不影响整体距离值计算结果，对于差流序列中的随机噪声具有很强的抗干扰性。

4 基于 Hausdorff 距离算法的差流波形相似性判断

理论上，对于理想故障电流而言，不考虑非周期分量及其幅值变化，其波形基本呈现正弦波特征；而对于涌流来讲（单向或对称性），因其产生受变压器铁芯饱和的影响，幅值的上升存在一个加速，所以呈现尖波的形态，与正弦波存在很大差异。因此我们可以将正弦波作为基准波形，将采样得到的差流波形与基准波形进行相似度的判断，若接近基准正弦波，则判别为故障差流，若偏离基准正弦波超过一定程度，则认为是涌流，以此来决定闭锁还是开放差动保护。

基于上述讨论，可以设计这样的比较过程：将目标波形（差流）与一个按照某种方式构造出来的标准正弦波基准波形（模板）进行相似度或匹配度的评估，来决定其所对应的扰动到底是内部故障还是涌流。根据前文介绍，Hausdorff 距离算法是反映目标图形与模板图形边缘特征点之间匹配程度的算法，因此，应用其进行差流波形与模板间的相似性判断。下面对基于 Hausdorff 距离算法的波形相似性判断逻辑进行设计。

因为比较的是差流波形形态的特征，其幅值的影响在 Hausdorff 距离计算中应当被剔除。剔除的方式为：在一定的采样率下，首先利用一个很短的时间窗获取差流的幅值信息，之后以该幅值信息作为基准，对差流进行比例压缩和纵向平移，得到标幺后的差流序列。标幺后的差流序列波形幅值变化范围设定为[-1,1]。将标幺后的差流序列作为 Hausdorff 距离算法目标图形的边缘特征点，将相同采样频率的幅值为 1 的标准正弦波序列作为 Hausdorff 距离算法模板图形的边缘特征点，计算两者间的 Hausdorff 距离。波形经过标幺化处理后，该 Hausdorff 距离计算值必然落在[0,1]之间，数值越小，代表差流序列的波形越接近正弦波，反之，数值越大，表示差流序列与正弦波的相似度越低。理论上，若是内部故障引起的差流，标幺后的故障差流序列与幅值为 1 的标准正弦波序列的 Hausdorff 距离应接近 0；而对于涌流引起的差流情况，两者 Hausdorff 距离应较大。我们首先考察几组理想故障差流和涌流与标准正弦波序列的 Hausdorff 距离计算值，再根据具体情况制定合理的整定原则，来对故障和涌流的情况进行有效区分。



(a) 内部故障差流　　(b) 单向励磁涌流

(c) 对称性涌流　　(d) 故障电流叠加涌流

图 1 标幺化差流与标准正弦波相似性比较

Fig.1 Comparison of normalized differential currents with standard sinusoidal waveform

图 1(a)~(d)分别给出了标幺化处理后的变压器内部故障差流、空载合闸单向励磁涌流、对称性涌流、带故障合闸差流（故障电流叠加涌流）与标准正弦波的相似性比较（图中虚线为标准正弦波，实线为差流波形），差流序列采样频率为 4kHz，即每周波采样 80 个点。对上述四组波形进行 Hausdorff 距离计算，Hausdorff 距离算法时间窗取为 1/4 个周波，距离计算值用 H 表示。表 1 分别列

举了一个完整周波内，第 1/4、第 1/2、第 3/4 和第 1 个周波结束时计算出的 H 值。

需要指出的是，以 1/4 周波滑动时间窗去截取电流采样数据时，对于对应于图 1(b)的空载合闸单向励磁涌流，在第 3/4 周波和第 4/4 周波期间，因为时间窗内的数据均接近于零，无法形成标准正弦模板的幅值，对于这种情况，定义 H 值为 1。

表 1 标幺化差流与标准正弦波 Hausdorff 距离计算值

Tab.1 Hausdorff distance values between the normalized differential current with standard sinusoidal waveform

差流类型	*H* 值			
	第 1/4 周波	第 1/2 周波	第 3/4 周波	第 1 周波
内部故障单纯故障差流(a)	0.097	0.041	0.082	0.068
空载合闸单向励磁涌流(b)	0.545	0.550	1	1
空载合闸对称性涌流(c)	0.582	0.563	0.580	0.544
故障电流叠加涌流(d)	0.482	0.467	0.118	0.112

从表 1 可以看到：

①对于变压器内部故障，标幺化差流序列与标准正弦波相似性非常好，4 个 1/4 周波窗计算的 H 值非常低，接近 0；

②对于单向励磁涌流和对称性涌流序列，计算出的 H 值均超过 0.5，数值较高，这表明两者与标准正弦波的相似度低。

③对于变压器带故障合闸的情况，其差流为故障电流与涌流的叠加，如图 1(d)所示，差流序列与标准正弦波的相似性在前 1/2 周波内较大，H 值在 0.4-0.5 之间，但在涌流幅值较小的负半波，差流已开始呈现典型故障电流特征，即在第 3/4-到第 1 个周波内，差流序列与标准正弦波的相似度增大，H 值在 0.12 以下。

基于上述分析，将内部故障时的理论 H 值作为判据整定的依据，但因理想情况下内部故障时，差流与标准正弦波之间 H 值理论上接近 0 甚至即为 0，工程实际中，若以 0 值作为整定基准，则无法有效进行可靠系数的乘除和灵敏度校验。考虑到标幺化处理后，H 计算值必然落在[0,1]之间，因此我们采用 H 计算值的补集作为判据基准，设定 $HS(k)=1-H(k)$，$k=1,2,3\ldots$，即在计算标幺化故障差流序列与幅值为 1 的标准正弦波序列的 Hausdorff 距离值 H 后，再计算出对应的 HS 值，以 HS 值大小作为判别内部故障和励磁涌流的依据。

因此，整定原则如下：

$$HS_{set} = HS_{theory} / K_{rel} \qquad (5)$$

其中，K_{rel} 一般取 1.15~1.3 之间。由于 HS_{theory} =1，不妨取 K_{rel}=1.3，则 HS_{set} =0.77。

根据表 1 的数据计算出相应的 HS 值和判据判别结果，如表 2 所示。

由表 2 可知，对于内部故障，HS 在整个时间窗扫描的范围内均大于 0.9，而对于两类典型的涌流，HS 均小 0.5。对于带故障合闸的案例，虽然在前半个周波 HS 均小于动作门槛，但在后半周波，已经提升到门槛之上，达到了 0.88 左右，显著高于门槛值。

表 2 标幺化差流与标准正弦波的 *HS* 计算值和判别结果

Tab.2 *HS* values and discrimination results between the normalized differential current with standard sinusoidal waveform

差流类型	*HS* 值（HS_{set}=0.77）			
	第 1/4 周波	第 1/2 周波	第 3/4 周波	第 1 周波
内部故障单纯故障差流(a)	0.903	0.951	0.918	0.932
	>0.77，保护动作			
空载合闸单向励磁涌流(b)	0.455	0.450	0	0
	<0.77，保护闭锁			
空载合闸对称性涌流(c)	0.418	0.437	0.420	0.456
	<0.77，保护闭锁			
故障电流叠加涌流(d)	0.518	0.533	0.882	0.888
	<0.77，保护闭锁		>0.77，保护动作	

综上可知，对于涌流情况，无论是单向涌流还是对称性涌流，HS 值始终在 0.77 的门槛值以下，保护能可靠闭锁；对于内部单纯故障差流，只需要 1/4 个周波，即 5ms，该判据即可做出正确判断，使保护正确动作；对于故障差流叠加涌流，采用本判据，最迟 3/4 个周波，即 15ms 也可做出正确判断，开放保护。

5 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据

根据前面的分析，Hausdorff 距离算法可以判别变压器的内部故障差流和励磁涌流。该算法主要基于序列的整体特征进行判断，不涉及信号从时域到频域的投射，时间窗的选取灵活，在用于差

动保护时，为保证获取到周期性序列的极值点，用于序列波形标幺化处理，可将时间窗设置为 1/4 周波。从第 1/4 个周波开始，时间窗每向后移动一个采样点，都可以更新一个 Hausdorff 距离值，实际将生成一个 *H* 值序列，进而产生 *HS* 值序列，用于实时判断差流变化暂态特征。

根据上一小节的分析，对于一般性的变压器内部故障差流或励磁涌流（包括对称性涌流），该算法在 1/4 周波（5ms）即可做出正确判断；而对于特殊场景，如故障电流叠加涌流的情况，最迟 3/4 周波（15ms）便可做出响应使保护正确动作。这体现了该算法的快速性。据此构造基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据，流程如图 2 所示。

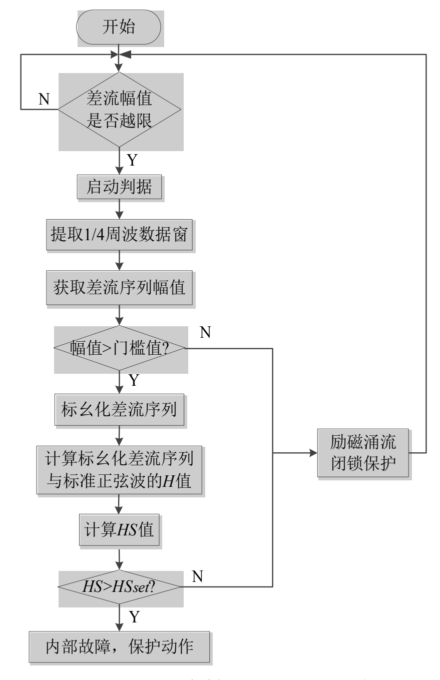


图 2 基于 Hausdorff 距离算法的差动保护判据流程图

Fig.2 Flow chart of the transformer differential protection criterion based on the Hausdorff distance algorithm

需要指出的是，该判据是基于差动保护差流幅值越限启动后才进行判别，现场差流幅值的获取目前至少半个周波，而这半个周波的数据同时可以拿来用作该判据第一个幅值的获取，在第一个幅值获取后，我们就可以往前追溯相应采样点而同步生成标准正弦波序列，来对标幺化差流波形进行对比，随着时间窗推移不停的有采样点退出时间窗而新的采样点进入时间窗，会实时地将新采样点纳入幅值计算并形成新的基准进行标幺化处理，理论上，该判据最快的动作时间能达到启动判据同样的动作速度，并且即使不能立刻判断，采用 1/4 周波时间窗往后推移，加之前面至少半个周波差流幅值越限启动判据已存在的采样点，也足够做出判别，一般情况下，在判据启动后 5ms 能做出判断。

在计算量方面，以 4kHz 采样率为例，1/4 周波窗长含 20 个采样点，完成一次 Hausdorff 距离计算总共执行约 2000 次加减运算，这对于目前功能强大的微机来说，所耗时间微乎其微，不会对差动保护的判别造成附加的延时。

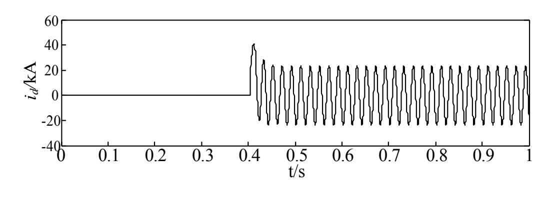
综上，该判据具有很高的动作可靠性，因此，在用于大型变压器差动保护时可采用分相制动的方式，与传统二次谐波制动判据一起，构成原理不同的两套主保护，以满足保护双重化配置的要求。

6 判据仿真试验验证

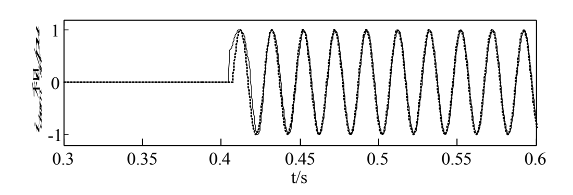
本小节对上述基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据进行仿真试验验证。采用文献[8]所述±800kV 特高压直流输电工程仿真模型，以整流侧换流站极 I 高端一组变压器为研究对象，将变压器一、二次侧电流全部折算到二次侧形成各种扰动场景下该组大差保护差流，仿真时长为 1s，差流和标准正弦波序列采样频率为 4kHz，即每周波采样 80 个点；差流幅值越限门槛采用常规的 0.25p.u.，Hausdorff 距离算法时间窗取为 1/4 周波，动作门槛 HS_{set}=0.77。

下文给出几例典型扰动的算例仿真结果，包括变压器经历内部故障、空载合闸单向励磁涌流、空载合闸对称性涌流、带故障合闸、正常空载合闸后发生内部故障以及变压器区外故障转区内故障的情况，并对算法抗干扰性进行了算例验证。在进行 Hausdorff 距离判据 *HS* 值计算时，涌流中对应于间断角部分的点，根据上述的处理原则，直接赋 *H* 值为 1，对应的 *HS* 值为 0。

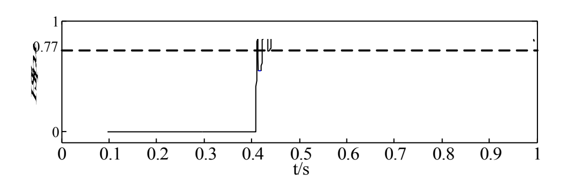
算例 1：变压器正常内部故障场景，t=0.405s 时 Y/Y 变压器一次侧出口三相接地故障。



(a) 差流波形



(b) 差流标幺化序列和标准正弦波序列



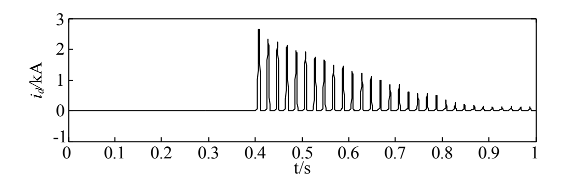
(c) 判据 *HS* 值计算序列

图 3 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 1）

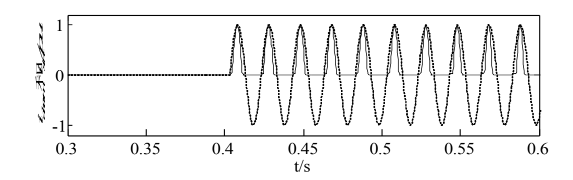
Fig.3 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 1)

如图 3 所示，图(a)为差流序列 i_d，图(b)给出了仿真时间 0.3~0.6s 之间标幺化处理后的差流序列 i_{dnorm}（实线表示）和标准正弦波序列 i_{sin}（点状线表示）的比较；图(c)则是根据图(b)所示两个序列采用 Hausdorff 距离算法判据后计算出的 *HS* 值序列。可以看到，判据启动后，在 t=0.41s，即故障发生后约 1/4 个周波，*HS* 计算值便超过动作门槛 0.77，保护迅速正确动作。

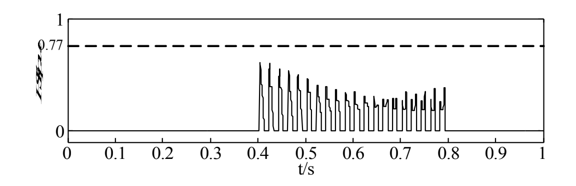
算例 2：该算例为单向励磁涌流场景， t=0.4s 合闸空载，即 A 相合闸初相角为-120°，合闸前 Y/Δ和 Y/Y 变各相初始剩磁均为 0。



(a) 差流波形



(b) 差流标幺化序列和标准正弦波序列

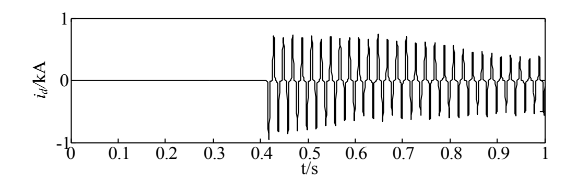


(c) 判据 *HS* 值计算序列

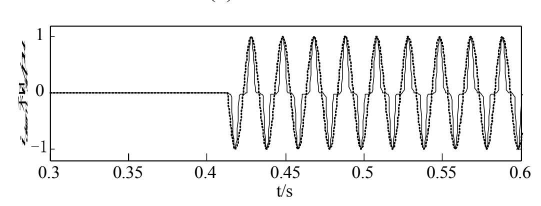
图 4 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 2）

Fig.4 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 2)

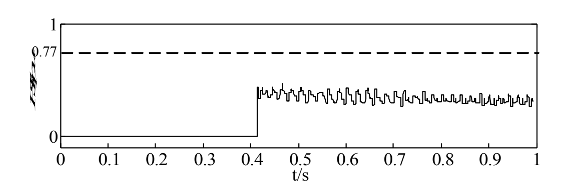
算例 3：该算例为对称性涌流场景，t=0.4113s 空载合闸，即 A 相合闸初相角为-120°，合闸前 Y/Δ和 Y/Y 变 A 相剩磁分别为 0.85p.u.和-0.85p.u.，其他相剩磁均为 0。



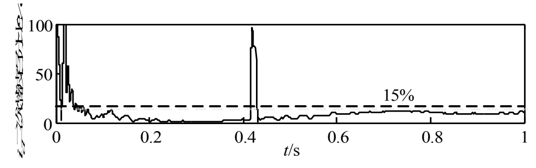
(a) 差流波形



(b) 差流标幺化序列和标准正弦波序列



(c) 判据 *HS* 值计算序列



(d) 差流二次谐波百分比分析

图 5 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 3）

Fig.5 Differential current and value of HS for the proposed criterion(Scenario 3)

算例 2 和算例 3 的仿真结果分别如图 4 和图 5 所示，图中各波形和变量含义与图 3 相同，不赘述。可以看到，无论是算例 2 的单向励磁涌流，还是算例 3 的对称性涌流，标幺化后差流与标准正弦波的 Hausdorff 距离判据 *HS* 值均稳定地低于 0.77 的动作门槛值，因此判别为涌流情况，能够可靠闭锁保护。值得注意的是，对算例 3 中差流二次谐波占基波百分比进行分析，如图 5(d)所示，可以看到对称性涌流的二次谐波百分比低于通常设定的 15% 制动门槛，若采用二次谐波制动判据，差动保护将误动；而采用本文所提判据则能有效防止此类

误动的发生。

算例 4：该算例为故障叠加涌流场景，换流变在 t=0.4s 空投，其中 Y/Y 换流变带 A、C 两相高阻接地故障，两台换流变各相初始剩磁均为 0，故障接地电阻为 70Ω。

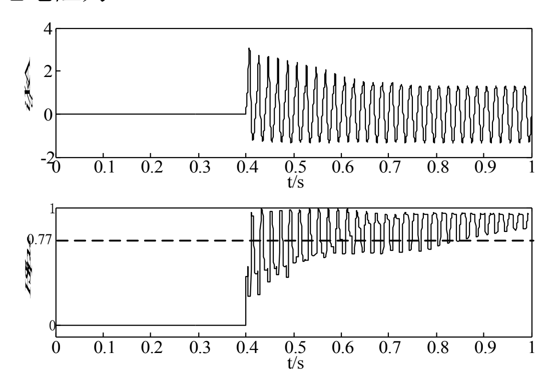


图 6 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 4）

Fig.6 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 4)

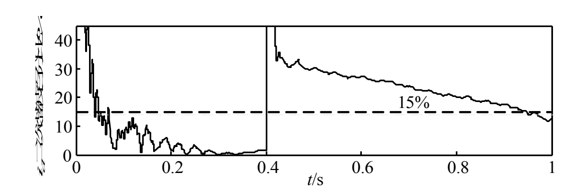


图 7 差流二次谐波占基波百分比（算例 4）

Fig.7 The ratio of second harmonic to fundamental of differential current (Scenario 4)

根据图 6，带高阻故障空载合闸情况下，在判据启动后，涌流特征明显的正半周，*HS* 值低于门槛值 0.77，保护被短暂闭锁；但到涌流值较小的负半周，*HS* 值迅速增大并超过 0.77 的动作门槛值；可以看到在 t=0.4105s，即变压器带高阻故障合闸后约半个周波后，判据即解除闭锁，开放保护，正确动作。对于此类差流为故障电流叠加涌流的情况，差流二次谐波百分比可能会高于 15%的制动门槛(如图 7)，二次谐波制动判据将误闭锁保护（或造成保护延时动作）；但采用本文所提判据，则能在很短时间内开放保护，使保护正确动作。

限于篇幅，以下算例 5-7 只给出差流波形和 Hausdorff 距离判据 *HS* 计算值序列。

算例 5：该算例为空载合闸励磁涌流后又发生变压器内部故障的场景，t=0.4s 变压器空载合闸，t=0.605s 发生 Y/Y 变一次侧出口三相接地故障。

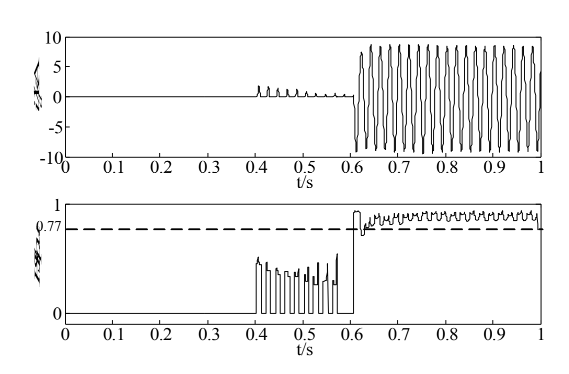


图 8 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 5）

Fig.8 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 5)

如图 8 可见，在空载合闸典型励磁涌流阶段，*HS* 计算值一直稳定地低于 0.77 的动作门槛，保护被可靠闭锁；当内部故障发生后，在 t=0.61s 时刻（内部故障发生约 1/4 个周波）*HS* 计算值超过 0.77 的动作门槛，解除闭锁，保护立刻正确动作。

算例 6：该算例为变压器经历区外故障转换为区内故障的场景，t=0.305s 发生 Y/Y 变外部三相短路故障，t=0.505s 故障转为 Y/Y 变一次侧出口三相接地故障。

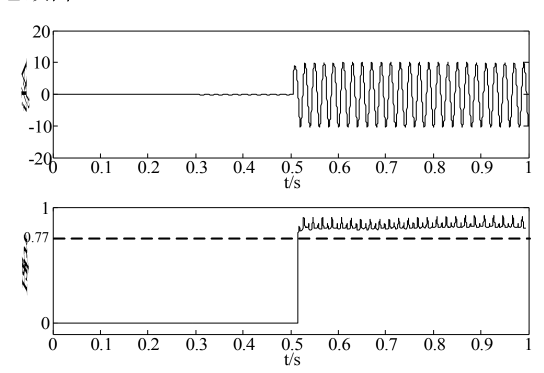


图 9 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 6）

Fig.9 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 6)

区外故障阶段，差流幅值较小，判据不予启动；当区外故障转为变压器区内故障后，判据立刻启动，在 t=0.51s，即故障转为区内故障后 1/4 个周波，*HS* 计算值超过动作门槛，保护迅速正确动作。

从上述仿真算例的结果可以看到，本文所提基于 Hausdorff 距离算法的差动保护新判据，在应对变压器经历各种内部故障、励磁涌流和发展性故障扰动时，均能够做出正确判断，并在速动性方面优势明显。

算例 7：抗干扰性分析

根据前文分析，Hausdorff 距离算法主要基于序列的整体特征进行判断，因此，受差流中非周期分量和高次谐波的影响很小；并且在整体特征相同的情况下部分点缺失对 Hausdorff 距离算法的影响较小，因此，该算法具备抗数据丢失的性能，可利用该性能，无需增加任何滤波环节即可使判据具备非常好的抗干扰能力。具体实现方法是：在进行 Hausdorff 距离计算前，根据实际情况设计在每个时间窗内舍弃若干极值点——对于没有噪声干扰的差流序列，舍弃部分点不影响整体波形特征，因此对 Hausdoff 距离计算值几乎没有影响；对于有噪声干扰的差流序列，若每个时间窗内舍弃 1 个极值点，则判据在采用 1/4 周波时间窗时，一个周期差流序列即可识别并舍弃至少 4 个噪声干扰点，足够满足工程实际中一个周波内最多考虑一个噪声干扰点的要求。

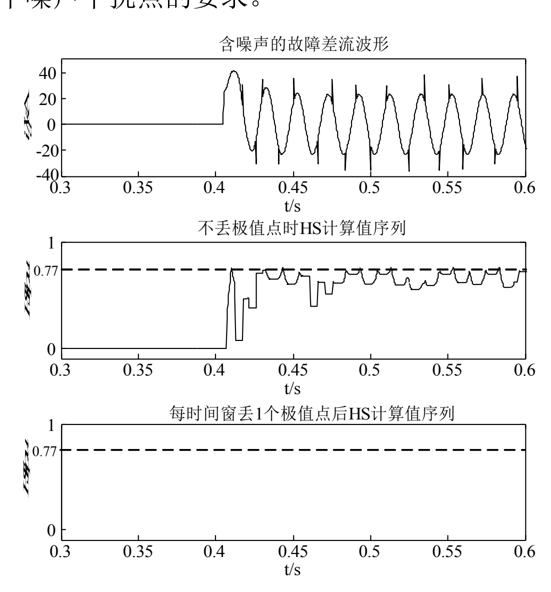


图 10 差流波形和判据 *HS* 值计算结果（算例 7）

Fig.10 Differential current and value of *HS* for the proposed criterion(Scenario 7)

在算例 1 的故障差流中，随机加入噪声干扰，采用上述方法对差流进行判断，图 10 给出了 0.3~0.6s 内含噪声干扰的差流波形、不丢极值点时判据 *HS* 计算值序列以及每时间窗丢弃 1 个极值点后判据 *HS* 计算值序列。可以看到，噪声干扰点较多时，对原始判据 *HS* 值计算是存在一定程度的影响的，有可能会使故障情况下 *HS* 计算值在门槛值附近起伏，影响判据正确判别。但采用简单的舍弃极值点的方法后，*HS* 计算值序列又很快稳定地高于动作门槛值，在 t=0.41s，即故障发生后约 1/4 个周波便可做出正确判断，使保护动作。这体现了基于 Hausdorff 距离算法新判据在抗干扰性方面有较强优势。

7 结论

本文基于涌流和故障电流波形整体形态的特征差异，结合 Hausdorff 距离算法在波形相似性判别中的优势，提出了基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据，并进行了仿真试验验证。结果表明，本文所提新判据能够快速正确地区分变压器励磁涌流和故障差流，对于二次谐波和波形对称判据容易误判的对称性涌流，也有较强的识别能力，可防止差动保护误动，并能有效识别故障电流叠加涌流的情况。该算法的优势还主要体现在两个方面：其一是计算量小，判别迅速，不会对保护启动造成其他延时，最快能达到跟保护启动同时判别，一般故障情况 5ms 便能做出判断；其二因 Hausdorff 距离算法抗数据丢失能力强，因此对于差流波形中有个别噪声干扰的情况，在执行算法具体计算前，设置舍弃部分极值点，不影响判别结果，体现了该算法优越的抗干扰性能。

由于励磁涌流波形特征受剩磁、绕组连接方式合闸相角等因素的影响，以波形特征为依据构成的判据及其门槛值的选取都无法保证保护在所有情况下都不误动，就如二次谐波制动判据一样，随着技术进步和制造工艺的提升，即使将二次谐波百分比门槛设置在一个很低的值，也无法确保所有涌流扰动时差动保护都能可靠制动。本文所提判据，是对基于电流波形特征应用的新的尝试，为变压器差动保护算法提供了一种新的实现方式，后续将对算法有效性进行动模试验和现场数据的验证，并借助大量数据选择合理的整定值，不断对算法进行优化和完善。

参考文献

[1] 赵永彬, 陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]．电工技术学报, 2007, 22(12): 66-71.
Zhao Yongbin, Lu Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 66-71.

[2] 刘玉欢, 陆于平, 袁宇波, 等. 基于磁制动原理的特高压变压器励磁涌流快速识别[J]．中国电机工程学报, 2007, 27(34): 52-58.
Liu Yuhuan, Lu Yuping, Yuan Yubo, et al. A novel scheme based on flux restraint theory used in distinguishing

inrush currents for UHV transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 52-58.
[3] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7):44-48.
Ge Baoming, Yu Xuehai, Wang Xiangheng, et al. A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7):44-48.
[4] 吴明雷, 李庆民, 段玉兵. 利用动态阻抗特性识别变压器的励磁涌流[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 50-60.
Wu Minglei, Li Qingmin, Duan Yubing. Identification of transformer magnetizing inrush current by use of dynamic impedance characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 50-60.
[5] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础. (第二版). 北京: 中国电力出版社, 1989: 152.
Wang Weijian, Hou Bingyun. Theoretical basis of large unit relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1989: 152.(In Chinese)
[6] 焦邵华，刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35-38.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current based on integrating the waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 35-38.
[7] 卢雪峰，王增平, 徐岩, 等. 基于波形间断角原理识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 继电器, 2007, 35: 1-4.
Lu Xuefeng, Wang Zengping, Xu Yan, et al. A new method to identify inrush current based on the principle of dead angle[J]. Relay, 2007, 35: 1-4.
[8] 翁汉琍, 李雪华, 鲁俊生, 等. 特高压换流变压器对称性涌流的生成及其对大差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 153-158.
Weng Hanli, Li Xuehua, Lu Junsheng, et al. Symmetrical inrush current mechanism of Ultra-high voltage converter transformer and its impact on converter connection-transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 153-158.
[9] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 761-762.
National electric power dispatching and communication center. Relay protection training materials of State Grid Corporation of China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 761-762.(In Chinese)
[10] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59.
He Jinghan, Li Jingzheng, Yao Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of Current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.
[11] 卢雪峰, 王增平, 徐岩, 等. 基于波形正弦特征和模糊贴近度原理的变压器励磁涌流识别方[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(6): 23-27.
Lu Xuefeng, Wang Zengping, Xu Yan, et al. Research on identifying inrush current of transformer based on the sine principle of current waveforms and the fuzzy degree nearness[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(6): 23-27.
[12] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
Shao Wenquan, Qiao Ni, Wang Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
[13] 索南加乐, 焦在滨, 张怿宁, 等. 基于波形系数的变压器励磁涌流快速识别算法研究[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 71-76.
Suonan Jiale, Jiao Zaibin, Zhang Yining, et al. A fast algorithm to identify inrush current based on waveform factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 71-76.
[14] 马静, 王增平, 徐岩. 用相关函数原理识别变压器励磁涌流和短路电流的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 78-81.
Ma Jing, Wang Zengping, Xu Yan. A now method to identify inrush current and short circuit current of transformer based on correlation function[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 78-81.
[15] 舒丽霞, 周成平, 彭晓明, 等. 基于 Hausdorff 距离图象配准方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(12): 1412-1417.
Shu Lixia, Zhou Chengping, Peng Xiaoming, et al. Image registration based on Hausdorff distance[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(12): 1412-1417.
[16] 刘健庄, 谢维信, 高新波, 等. 基于 Hausdorff 距离和遗传算法的物体匹配方法[J]. 电子学报, 1996, 24(4): 1-6.

Liu Jianzhuang, Xie Weixin, Gao Xinbo, et al. Hausdorff distance based object matching with Genetic algorithms[J]. ACTA Electronica Sinica, 1996, 24(4): 1-6.

[17] 练仕榴．生物医学信号的相似性度量研究[D]．天津：天津理工大学，2011．
Lian Shiliu. Research of similarity measurement for biomedical signal[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2011. (In Chinese)

[18] 谢远国. 心电波形的检测与分类技术研究[D]. 天津：天津大学, 2004.
Xie Yuanguo. A research of ECG detection and classification technology[D]. Tianjin: Tianjin University， 2004.(In Chinese)

作者简介：



翁汉琍(1980-)，女，博士，高级工程师，研究方向为电力系统分析、继电保护与控制，honey_weng@163.com；

刘华(1991-)，女，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护；

林湘宁(1970-)，男，博士，教授，研究方向为电力系统安全分析、继电保护与控制。

基金资助：

本项目由国家自然科学基金项目资助：

项目名称：交直耦合深化后换流站差动类保护误动共性问题分析及新原理研究（Universal Mal-operation Problem Analyses and Novel Principle Studies on Differential-type Protections Applied in Converter Substation under AC-DC Deeply Coupling Interactions）

项目号：51607106

执行期：2017.1-2019.12

负责人：翁汉琍

依托单位：三峡大学

该项目概况：在研究换流站主设备固有复杂电磁场景和交直流深度耦合趋势带来的换流站差动类保护误动潜在场景的基础上，结合适应多种复杂电磁场景的 TA 传变模型优选，对复杂涌流/环流传递作用、大时间尺度高直流偏磁、多重连续换相失败及 TA 传递异变规律开展透彻研究，揭示当前换流站桥差、大差和零差保护各种不明原因误动及未来因外部环境进一步复杂化而承受潜在误动风险的机理，借助包括 Hausdorff 图形识别算法在内的先进信号处理技术，提出换流站主设备差动类保护新原理与新方案，进行 PSCAD 仿真和 RTDS 闭环测试验证。